

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIAS SOCIOECONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN AGROPECUARIA



Evaluación del Efecto de la Aplicación de Nanopartículas Elaboradas a Base de Cobre y de Selenio, en la Germinación de Semillas de Maíz (*Zea mays* L.)

Por:

JOSEPH ISAIAS MORENO AXOL

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO ADMINISTRADOR

Saltillo, Coahuila, México

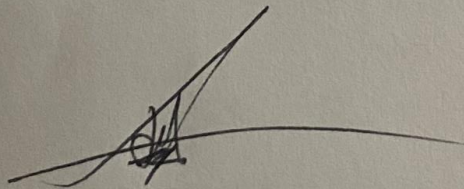
Noviembre 2024

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

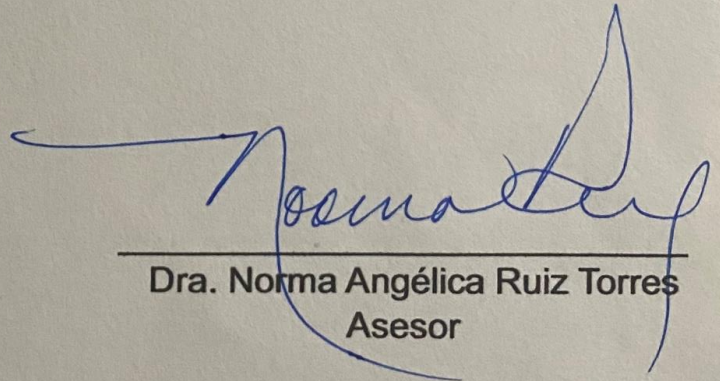
El autor de este trabajo es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega), reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio), comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia, omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo es original.



Joseph Isaias Moreno Axol
Autor



Dra. Norma Angélica Ruiz Torres
Asesor

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIAS SOCIOECONÓMICAS

Evaluación Del Efecto De La Aplicación De Nanopartículas Elaboradas
A Base De Cobre y de Selenio, En La Germinación De Semillas De
Maíz (*Zea mays L.*)

Por:

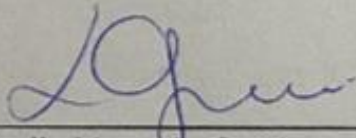
JOSEPH ISAIAS MORENO AXOL

TESIS

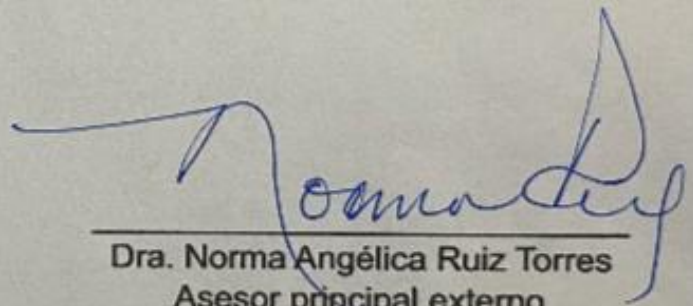
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO ADMINISTRADOR

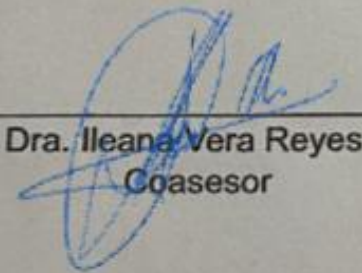
Aprobada por el Comité de Asesoría



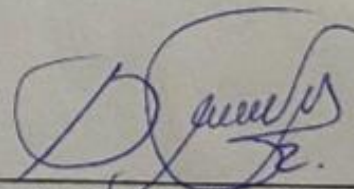
Dra. Lydia Venecia Gutiérrez López
Asesor principal interno



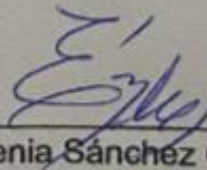
Dra. Norma Angélica Ruiz Torres
Asesor principal externo



Dra. Ileana Vera Reyes
Coasesor



Dra. María Griselda García Pérez
Coasesor



Norma Eugenia Sánchez García
Coordinador de la División de Ciencias Socioeconómicas



Saltillo, Coahuila, México, Noviembre 2024

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Todo poderoso, por darme la vida y por cuidar siempre de mis seres queridos, además de permitirme concluir mi carrera y darme las fuerzas para entender y enfrentar los retos de la vida, por todo eso y mucho más, te doy las gracias, padre.

A mi Alma Mater

A la “*UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO*” por darme la oportunidad de ser parte de ella al formarme como profesionista en su casa de estudios, por los hermosos e inolvidables momentos que viví en esta universidad al lado de mis compañeros y profesores, es un orgullo llevar tu nombre y ser buitre por siempre.

A la *DRA. NORMA ANGELICA RUIZ TORRES* por la oportunidad de realizar esta investigación a pesar de no ser parte de su departamento, por el tiempo dedicado a este trabajo, por sus asesorías, conocimientos, experiencia y sobre todo por la confianza y paciencia brindada. *¡Muchas gracias!*

A la *DRA. LYDIA VENEZIA GUTIÉRREZ LÓPEZ* por la confianza y el apoyo brindado como docente y tutora, dándome ánimos y consejos en los momentos difíciles que afronte a lo largo de la carrera, los cuales me permitieron seguir adelante en mis proyectos tanto profesionales como personales, y que me han llevado a las instancias en las que hoy me encuentro.

A la *PROFA. MARIA GRISELDA GARCIA PEREZ* por las enseñanzas y el apoyo que me brindo a lo largo de la carrera en sus clases y proyectos, que me mostraron el camino para desarrollar mis habilidades de criterio y en gestión en temas administrativos y contables.

DEDICATORIAS

A mis padres, Isaías y María Ciria.

Mamá, papá, gracias por darme lo más valioso que tengo que es la vida.

Gracias por su apoyo, su confianza, sus consejos y por todo lo demás que me han enseñado a lo largo de mi vida, gracias por el esfuerzo y sacrificio que realizaron para criarme y hacerme un hombre de bien, con los valores que me inculcaron siempre grabados en mi mente, y por ayudarme a cumplir cada meta que me propongo. Gracias por ser mis padres y quiero que sepan que estoy muy orgulloso de ser su hijo. Los llevo siempre en mi mente y mi corazón.

Muchas gracias, padres, los amo y espero y dios los cuide y los bendiga siempre.

A mis hermanas Geraldine y Nathalie Adilene.

Gracias por todos los momentos que pasamos juntos y por ser una de las mayores motivaciones en mi camino, por estar siempre que las necesito, y por aguantar mi carácter todo el tiempo que pasamos juntos, aunque sé que no es fácil, gracias, Nathalie por escuchar siempre mis problemas y darme consejo, así como también consolarme en mis momentos más vulnerables, gracias, Geraldine por cuidarme de pequeño y por ayudarme en mis momentos donde necesitaba consejo.

A mis Abuelos

Martin Moreno y Valentina Colorado

Tomas Axol y Teresa Peña

Gracias por todas las lecciones que me dieron, por los momentos buenos y malos que pasamos, gracias por siempre preocuparse por mi bienestar, por inculcarme el amor por la agricultura, puesto que no sería lo que soy sin sus consejos e historias, gracias por todo su amor y su cariño que siempre le han expresado a sus nietos, gracias por su apoyo incondicional y por las miles de palabras de aliento que me han brindado todo el tiempo, por todo lo que me han enseñado con su sabiduría y consejos, por esto y muchas cosas más gracias.

No podría pedir mejores abuelos de lo que son ustedes para mí. Espero que dios me permita hoy y siempre tenerlos a mi lado.

A mis tíos y tías

Humberto, Laura, Eugenio, Eliseo, Juana M., Rosario, Primitivo, Elena, Lucia, Honorio, Irasema, Octavio Gladis, Leopoldo, Francis, Isidro, Gabriela, Teresa, Pedro Leónides, Daniel, María, Carlos, Jessy, Juana A., Angelica, Inocencio, Saul, Alejandra, Felipe, Gloria

Gracias a todos por acompañarme a lo largo de lo que llevo de vida, por estar siempre cuando los necesito, también por enseñarme a trabajar y al mismo tiempo a vivir, gracias por todos los consejos, oraciones y comentarios, porque poco o mucho influyen en mi personalidad y me han ayudado a llegar hasta donde estoy, gracias por compartir conmigo los buenos y malos momentos, gracias todo y por mucho más.

A mis primos

Kevin, Jankarlo, Avimael, Charlie, Julisa, Pablo, Eduviges, Arnold, Violeta, Diego, Ilder, Cristian, Heidi, Oliver, Daisy, Jaely, Axel, Ximena, Kimberly, Evelin, Brandon, Camila, Yeicob, Marisol, Víctor, Luis F., Miguel, Valeria, Iker, Said Sasha, Janet, Jely, Cristian E., Omar, Romina, Dulce, Daniel, Yael, Emir, Italia, Aldo, Damián (Q.D.P)

Gracias por todos los momentos que pase junto a ustedes, son preciados recuerdos para mí, gracias porque algunos de ustedes fueron mi inspiración y mi modelo a seguir en algunas ocasiones, gracias por siempre apoyarme y estar allí cuando los necesito, gracias por darme el impulso que me hace falta para realizar mis metas, porque quiero ser un ejemplo para algunos de ustedes y el orgullo de los demás, gracias por todos los buenos y malos momentos que vivimos juntos.

A mis amigos

*Fernando, Eduardo , Gerardo , Fernando B. , Juan, Alejandro , Miguel , Armando
Albret, Ivon, Esteban, Cristian, Manuel Y Todos los compañeros de los
internados de la UAAAN*

Gracias por los momentos que pasamos y el tiempo que compartimos tanto dentro como fuera de lo académico, gracias por las lecciones y el apoyo que me brindaron en su momento.

A mis veteranos

Gracias por apoyarme al inicio de esta aventura, con consejos y la amistad que me brindaron siempre, por darme donde llegar y saber que siempre fui bien recibido por ustedes, gracias por mostrarme la camaradería y los valores que debe de tener un buitre.

A mis maestros y compañeros

Gracias por las enseñanzas y lecciones que me dejaron en cada una de sus clases, por confiar en mí y por siempre exigirme más para poder crecer tanto en lo académico como persona.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	11
I. INTRODUCCIÓN.....	14
II. HIPÓTESIS.....	15
III. OBJETIVO GENERAL.....	15
IV. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
V. REVISIÓN DE LITERATURA.....	16
1. Nutrición de las Plantas	16
2. Cobre en la Agricultura.....	16
2.1 Fitotoxicidad del Cobre en las Plantas	17
2.2 Deficiencia de Cobre en las Plantas.....	17
2.3 Nanopartículas de Cobre.....	18
3. Selenio en las Plantas.....	18
3.1 Fitotoxicidad del Selenio en las Plantas	19
3.2. Nanopartículas de Selenio en las Plantas	20
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	22
1. Ubicación del sitio del experimento	22
2. Preparación de las Soluciones con Nanopartículas	22
3. Imbibición de semillas de maíz RX-715 (Zea mays)	22
4. Variables Evaluadas.....	23
4.1. Porciento de vigor de germinación	23
4.2. Porciento de germinación.....	23
4.3. Porciento de plántulas con alto y bajo vigor.....	23
4.4. Porciento de plántulas anormales.....	23
4.5. Porciento de semillas sin germinar.....	24
4.6. Índice de radícula.....	24
4.7. Índice de plúmula.....	24
4.8. Peso seco de la radícula y del tallo.....	24
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
1. Bioensayo con NPsCuO	25

1. Bioensayo con NPsSe.....	32
2. Análisis de correlación para el estudio con NPsCuO	37
3. Análisis de correlación para el estudio con NPsSe	39
VIII. Conclusiones	41
IX. BIBLIOGRAFÍA	43
X. Anexos	46

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadros medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz RX-715 tratadas con NPsCuO.....	28
Cuadro 2. Comparación de medias por tratamiento para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz RX-715 tratadas con NPsCuO.....	31
Cuadro 3. Cuadros medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación en semillas de maíz RX-715 tratadas con NPsSe.....	33
Cuadro 4. Comparación de medias por concentración para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación en semillas de maíz RX-715 tratadas con NPsSe.....	36
Cuadro 5. Coeficientes de correlación entre las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz RX-715 tratadas con nanopartículas de Cobre (Cu).	38
Cuadro 6. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación en semillas de maíz RX-715 tratadas con NPsSe.....	40
Anexo 1. Valores medios de la variable plántulas con bajo vigor (PBV) expresados en porcentaje para tratamientos con diferentes concentraciones de NPsSe.....	46
Anexo 2. Valores medios de la variable semillas sin germinar expresados en porcentaje para tratamientos con diferentes concentraciones de NPsSe.	46
Anexo 3. Valores medios por tratamiento con NPsSe para la variable peso seco de radícula.....	47
Anexo 4. Valores medios por tratamiento con NPsSe para la variable índice de longitud de la plúmula (INDP).	47
Anexo 5. Valores medios por tratamiento con NPsSe para la variable índice de longitud de la radícula (INDR).	48
Anexo 6. Valores medios de la variable vigor de germinación expresados en porcentaje para tratamientos con diferentes concentraciones de NPsCuO.	48
Anexo 7. Valores medios por tratamiento con NPsCuO para la variable peso seco de la plúmula.	49
Anexo 8. Valores medios por tratamiento con NPsCuO para la variable peso seco de la radícula.....	49
Anexo 9. Valores medios por tratamiento con NPsCuO para la variable índice de longitud plúmula (INDP).....	50
Anexo 10. Valores medios por tratamiento con NPsCuO para la variable índice de longitud de la radícula (INDR).....	50

RESUMEN

En la agronomía, durante las últimas décadas se han buscado tecnologías que ayuden a obtener un mayor rendimiento de los cultivos utilizados para consumo humano y animal. Entre esas tecnologías se encuentran las nanopartículas (NPs), estos nanomateriales son productos a base de cerámicos, polímeros o metales, que, debido a su tamaño microscópico, permiten una mejor absorción por parte de la planta, y de esta manera son aprovechados más eficientemente, aumentando así el desarrollo y la producción de esta.

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la respuesta a la aplicación durante la imbibición, de suspensiones con nanopartículas de óxido de cobre y de selenio (NPsCuO y NPsSe), en semillas de maíz, sus efectos en el crecimiento y en el desarrollo de las plántulas, con la finalidad de determinar la concentración de NPsCuO y de NPsSe que las estimula o las inhibe.

En este experimento se prepararon tratamientos con suspensiones de NPsSe o NPsCuO, con cuatro repeticiones de 25 semillas cada una. Previo a la siembra, las semillas se inhibieron en cajas de Petri (60 x 15 mm), en 10 ml de cada suspensión de acuerdo con el tratamiento (NPsCuO a 0, 10, 20, 30, 40 y 50 ppm, y NPsSe a 0, 5, 10, 15, 20 y 25 ppm),. Cada caja de Petri contenía 105 semillas por tratamiento. Las cajas de Petri con las semillas inmersas en la suspensión fueron colocadas en una cámara bioclimática a una temperatura de 25°C. Posteriormente, la siembra se realizó entre dos capas de papel Anchor, humedecido en agua destilada, colocando las semillas en forma horizontal, y enrollando en forma de taco. Los “tacos” se mantuvieron dentro de una bolsa de polietileno transparente, contenidos en un recipiente de plástico en una cámara bioclimática a una temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Posteriormente se realizaron conteos para determinar las variables en estudio (porcentaje de vigor de germinación, germinación, plántulas con alto vigor, plántulas con bajo vigor, plántulas anormales, semillas sin germinar,

peso seco de la plúmula, peso seco de la radícula, índice de crecimiento de la plúmula e índice de crecimiento de radícula).

Una vez realizada la evaluación del bioensayo, se tomaron las plántulas normales y se dividieron en radículas y tallos de cada repetición por tratamiento, para posteriormente ser colocados en bolsas de papel de estraza, previamente identificadas, las cuales se pusieron en una estufa (Riossa modelo H-48), a una temperatura de 72 °C por un periodo de 24 horas. Enseguida, se sacaron las muestras de la estufa y se pusieron en un desecador por 15 minutos, a fin de evitar que tomaran humedad del ambiente. Una vez pasado el tiempo se pesó cada repetición en una balanza analítica (Precisa modelo BJ610C), para determinar el peso de materia seca expresado en mg/plántula.

De acuerdo con los resultados, se observó que las NPsCuO no tuvieron un efecto promotor en las variables vigor de la germinación, peso seco de plúmula y peso seco de la radícula, ya que la respuesta a los tratamientos fue menor o estadísticamente igual al testigo. Para la variable índice de plúmula, el tratamiento con 30 ppm (1.53), superó estadísticamente al testigo que obtuvo 1.22.

Por otra parte, la aplicación a semillas de NPsSe a 25 ppm durante la imbibición, superó estadísticamente a todos los tratamientos en la variable peso seco de la radícula. En cuanto al índice de plúmula, el tratamiento con 15 ppm resultó superior al testigo, 5 y 25 ppm. En la variable índice de radícula, imbibir las semillas en una suspensión con 25 ppm, superó estadísticamente a todos los tratamientos. Las NPsSe tuvieron un efecto positivo en la variable peso seco de la radícula.

En cuanto a las correlaciones entre variables en el estudio con NPsCuO, se encontraron coeficientes positivos y significativos entre la

variable vigor de germinación y plántulas con alto vigor, así como con el peso seco de la radícula. La variable porcentaje de germinación se correlacionó significativamente con la variable porcentaje de plántulas con alto vigor. Además, el peso seco la plúmula se correlacionó positivamente con el peso seco de la radícula.

Para el estudio con NPsSe, las principales correlaciones se presentaron entre variables relacionadas con el vigor de la semilla (porcentaje de germinación y porcentaje de plántulas con alto vigor), dejando ver su efecto en el metabolismo celular.

Palabras clave: Nanopartículas, Nanomateriales, estomas, encimas, biomasa, peso seco.

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de la agricultura se han buscado maneras de innovar en el aprovechamiento de los nutrientes que le proporcionamos a las plantas para un mejor desarrollo, y por ende un mejor rendimiento, es por eso que la industria agroalimentaria está siempre buscando nuevas formas de mejorar y permitirle a los productores nuevas herramientas y conocimientos que faciliten la obtención de plantas más vigorosas, con mayor número de frutos, que se traduce en mejores rendimientos por hectárea y una disminución en los costos de producción.

Una de estas nuevas tecnologías que se ha comenzado a implementar es el uso de nanopartículas, tanto en campo como en investigaciones en ambientes controlados, que permiten obtener información de manera más concisa de las repercusiones que tiene la presencia de diversos iones, los cuales pueden reforzar la estructura de la planta, así como también acelerar procesos químicos dentro de las mismas, o por el contrario llegar a niveles tan tóxicos que entorpezca la absorción de otros nutrientes, o en casos llegar a interferir activamente con los procesos bioquímicos de la planta. Por lo que, en la actualidad existen diversas investigaciones que buscan conocer los niveles de concentración óptimos de cada elemento que permitan obtener los mejores resultados para la agricultura. Dando como resultado que en los últimos años se lleven a cabo experimentos con los iones que podemos encontrar en el suelo en mayor y menor concentración. Uno de estos ejemplos es el cobre, que, si bien no es uno de los elementos más abundantes en el suelo de manera natural, existen una gran variedad de fertilizantes y plaguicidas que lo utilizan, lo que en ocasiones genera una concentración tóxica que afecta directamente a las plantas, de igual manera el selenio que no es considerado un elemento esencial en el desarrollo de la planta, sino que al aplicarlo en pequeñas cantidades podría generar beneficios en el metabolismo celular.

Tomando en cuenta lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo la evaluación del efecto que genera la aplicación de nanopartículas de Se y Cu (NPsCuO y NPsSe) en semillas de maíz (*Zea mays*), de la variedad RX-715, a diferentes concentraciones, en la germinación y el vigor de plántula.

II. HIPÓTESIS

Ho: Las nanopartículas de cobre y de selenio estimulan el vigor de germinación, el crecimiento de plántulas y la acumulación de biomasa en maíz.

Hi: Las nanopartículas de cobre y de selenio reducen el vigor de germinación, el crecimiento de plántulas y la acumulación de biomasa en maíz.

III. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la respuesta de las variables fisiológicas relacionadas con la germinación de semillas de maíz y con el vigor de plántulas del híbrido RX-715, a la aplicación de suspensiones con nanopartículas de Cobre (NPsCuO) y de Selenio (NPsSe), durante el proceso de imbibición.

IV. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar el efecto de la aplicación a semillas de NPsCuO y de NPsSe en suspensión, durante la fase de imbibición, y la respuesta de variables asociadas con la germinación, el desarrollo de plántulas, y la acumulación de biomasa en maíz.
2. Determinar si la absorción de las NPsCuO y de las NPsSe durante la imbibición, genera una respuesta de toxicidad en plántulas de maíz.

V. REVISIÓN DE LITERATURA

1. Nutrición de las Plantas

La nutrición puede definirse como el suministro y la absorción de compuestos químicos necesarios para el crecimiento y el metabolismo, y los nutrientes los compuestos químicos requeridos por una semilla, planta o cultivo. Los mecanismos por el cual los nutrientes se convierten en material celular o suministran energía son llamados procesos metabólicos. Así, la nutrición y el metabolismo están cercanamente relacionados entre sí. Los nutrientes pueden dividirse en macronutrientes (C, N, H, O, S, P, K, Ca, Mg) y micronutrientes (Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B y Cl), y las plantas los necesitan en diferentes cantidades (Mengel y Kirkby, 2000).

2. Cobre en la Agricultura

El cobre es un metal esencial para el crecimiento y desarrollo normal de las plantas. El contenido en sus tejidos es de 3-25 ppm, este elemento participa en los procesos bioquímicos tales como la fotosíntesis, respiración, respuesta al estrés oxidativo, metabolismo de la pared celular, señalización de hormonas, cofactor de varias enzimas como el superóxido dismutasa, citocromo oxidasa, amino oxidasa, lacasa, plastocianina y polifenol oxidasa, además juega un papel esencial de señalización de transcripción y tráfico de proteínas (Villegas Torres et al., 2015).

En un estudio con niveles altos de cobre en el suelo (2.0 - 4.0 mmol kg⁻¹), disminuyó considerablemente la biomasa de la planta de amaranto, causando efectos graves sobre el crecimiento. El contenido de pigmentos fotosintéticos y elementos minerales como el Fe, K y Mg disminuyeron en las hojas de las plantas. Además, el contenido de especies reactivas de oxígeno (ROS) y las actividades de las enzimas superóxido dismutasa (SOD) y la

guayacol peroxidasa (GPOD), así como la peroxidación lipídica y la fuga de electrolitos aumentaron, pero la catalasa (CAT) y el ascorbato peroxidasa (APX) disminuyeron (Villegas Torres et al., 2015).

2.1 Fitotoxicidad del Cobre en las Plantas

Se ha observado que el exceso de cobre activa la proteína mitogénica quinasa, y se sugiere que esta proteína participa en la señalización de la transducción inducida por metales pesados y en la fosforilación de proteínas (Villegas Torres et al., 2015). Se ha estudiado la participación de la quinasa en la señalización y su relación con el estado redox celular en raíces y hojas de plantas de *Arabidopsis thaliana* sometidas a estrés por metales, y se ha concluido que la quinasa juega un importante papel en la señalización celular durante la toxicidad inducida por cobre en las raíces (Smeets et al., 2013).

El exceso de cobre afecta el crecimiento y la tasa de germinación de manera directa en *Bidens pilosa* (cadillo), reduciendo la longitud del tallo y de la raíz y sus respectivos pesos frescos y secos. La mayor acumulación del metal se observó en la raíz, y el índice de transferencia es elevado a $100 \mu\text{mL}^{-1}$, la acumulación en las raíces es debido a que los iones metálicos pueden ser absorbidos por las pectinas de la pared celular y por el apoplasto, el cual es un compartimiento dinámico que puede ayudar a ajustar el número y tipo de metal que se une a las pectinas como respuesta al estrés por el metal (Chico-Ruíz et al., 2022).

2.2 Deficiencia de Cobre en las Plantas

La deficiencia de cobre se reconoce en las plantas por la coloración azulada que presentan las hojas, las cuales se tornan cloróticas cerca de la punta, además se desarrolla una clorosis descendente a ambos lados de la nervadura central que

posteriormente se torna café oscuro, con necrosis en la punta. Las hojas nuevas no se desenrollan y permanecen en forma de aguja, sin embargo, la base se desarrolla normalmente (Tito Zea, 2014).

2.3 Nanopartículas de Cobre

Los nanomateriales son una clase de productos innovadores derivados de cerámicos, polímeros y metales, entre otros, con la característica de que por lo menos una de sus dimensiones se encuentra entre 1 y 100 nm. Los nanomateriales, a causa de su tamaño reducido presentan propiedades modificadas (Wing C., 2006).

Las nanopartículas (NPs) de Cu y sus derivados han demostrado tener una amplia aplicación en la industria por su actividad antimicrobiana, por lo cual es común encontrarlas presentes en los productos procedentes por las grandes industrias. La abundante presencia de estas NPs que eventualmente son liberadas al ambiente, formula nuevas dudas acerca de los efectos que podrían causar al interactuar con organismos que las pueden absorber fácilmente, como las plantas. Los resultados de un estudio con maíz demostraron que existe una tendencia de disminución en la longitud de raíz e hipocótilo conforme aumenta la concentración de la NPsCuO y de CuO, sin embargo, este decremento en el desarrollo de la plántula no fue significativo con respecto al control ($P>0.05$). Con respecto a la germinación, se observó un aumento en el porcentaje conforme aumentó la concentración de NPsCuO, el cual no fue significativo al compararse con el control ($p>0.05$). Estos resultados indican que las plántulas de maíz fueron tolerantes a las NPsCuO y de CuO, en concentraciones de hasta 1000 ppm (Miranda y Sauza, 2023).

3. Selenio en las Plantas

Hasta la fecha, aunque no se ha demostrado la esencialidad del selenio (Se) en las plantas, existen numerosos informes que describen sus efectos beneficiosos sobre el crecimiento de las plantas. Se ha documentado que como constituyente de varias proteínas, el Se mejora la síntesis de almidón y del ATP, regula el estado del agua y retrasa la madurez, lo que ayuda a prevenir la pérdida de clorofila durante la sequía. Además, también se ha reportado que regula las reacciones redox y la homeostasis redox celular (Setty et al., 2023).

Todas las formas de selenio (Se) han sido encontradas en hojas, tallos y raíces de plantas, en general las plantas cultivadas que crecen en suelos no seleríferos presentan concentraciones de Se de 0.01 a 1 mg kg⁻¹ de peso seco. El Se es metabolizado en las plantas por la vía de asimilación del azufre y su distribución y acumulación dependerá de la especie química y la concentración del elemento suministrado a las raíces y por vía foliar. Respecto a su forma química, en el corto plazo la mayor parte del Se es tomado como selenato y se mantiene en forma inorgánica, mientras que como selenito se acumula en su forma orgánica (Castillo et al., 2013).

La aplicación de selenio en plantas, a bajas concentraciones, resulta en una mejora en su crecimiento, además, disminuye el estrés abiótico. Por otro lado, la mayoría de las selenoproteínas, es decir, proteínas que contienen SeCyt (21° aminoácido natural (SeCyt), codificado por el codón UGA), tienen la capacidad de actuar como oxidorreductasas, previniendo el daño a componentes celulares (Macias, 2022).

3.1 Fitotoxicidad del Selenio en las Plantas

Los niveles tóxicos de Se en las plantas causan la generación de radicales superóxidos, la sustitución del S en proteínas por Se, la sustitución de aminoácidos, cisteína (Cys) y metionina (Met), por selenio aminoácidos (SeCys y SeMet) durante

la síntesis de proteínas y la inhibición de la metilación, lo que indica que el Se actúa como un pro-oxidante (Sors et al., 2005).

En una investigación llevada a cabo en el cultivo del tomate, la aplicación de selenio (10 y 20 mg L⁻¹) por medio de la solución fertilizante en el sustrato, causó un efecto negativo en la biomasa. Sin embargo, la producción de fruto aumentó con la aplicación de 10 mg L⁻¹ de Se, pero no se observaron cambios al aplicar 20 mg L⁻¹. Al aplicar de manera foliar, se obtuvo una concentración de Se en tallo y hojas mayor a 10 µg g⁻¹ con aumento en la biomasa, pero sin una mayor producción de fruto (Becvort et al., 2012).

3.2. Nanopartículas de Selenio en las Plantas

La síntesis verde de NPsSe es una opción viable para su aplicación en plantas, se han obtenido usando como base extractos metanólicos de *Caléndula officinalis* (NPsSe de 133 nm), y otras con extractos de *Amphipterygium glaucum* (NPsSe de 8 nm). Para medir su efecto en plantas se aplicaron 3 tratamientos con dos concentraciones (20 y 50 µM), en frijol (*Phaseolus vulgaris*), las variables analizadas fueron: altura de planta, número de vainas por planta y número de brotes de flores. Los tratamientos con NPsSe aumentaron la producción del cultivo, las plantas tratadas tuvieron mayor crecimiento, más vainas y una mayor cantidad de flores. La diferencia de los resultados pudo deberse al tamaño de partícula (8 y 133 nm). A menor tamaño de las NPs, más fácilmente atraviesa las estructuras de las hojas. Por lo que, un tratamiento con NPsSe de 8 nm, a baja concentración (20 µM), puede ser de beneficio para la planta, por otra parte, a mayor concentración puede causar toxicidad (Macias, 2022).

De acuerdo con INTAGRI (2018), antes de establecer proyectos de biofortificación con Se, se debe conocer los niveles benéficos y los tóxicos en

los productos alimenticios finales, ya que la diferencia entre la deficiencia y la toxicidad es pequeña, y depende de factores como la concentración de sulfato que las acompañe, y de los genotipos, ya que las plantas responden de manera diferente a su aplicación. En países donde el contenido de Se en suelo es muy bajo, se adiciona en los fertilizantes empleados en los cultivos a razón de 10 ppm; pero, esto depende de las condiciones específicas de cada región.

En este trabajo de investigación, se trataron semillas de un híbrido de maíz, con NPsCuO y NPsSe, para conocer su efecto en el proceso de germinación.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Ubicación del sitio del experimento

El presente trabajo se llevó a cabo en el Laboratorio de Fisiología de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas del Departamento de Fitomejoramiento, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN).

2. Preparación de las Soluciones con Nanopartículas

Las soluciones con NPsCuO se prepararon a concentraciones de 0, 10, 20, 30, 40 y 50 ppm, y de 0, 5, 10, 15, 20 y 25 ppm para las NPsSe, en agua destilada. Cada suspensión se sometió a un proceso de sonicación durante diez minutos, para asegurar la dispersión de las NPsCuO y NPsSe, para lo cual se utilizó un ultrasonicador marca Vevor.

3. Imbibición de semillas de maíz RX-715 (Zea mays)

Para determinar el efecto de las NPs en la germinación de semillas de maíz del híbrido RX-715, se estableció un bioensayo, donde se evaluaron dos tipos: NPsCuO y NPsSe, a seis concentraciones diferentes cada una (0, 10, 20, 30, 40, 50 ppm y 0, 5, 10, 15, 20, 25 ppm, respectivamente). Cada tratamiento constó de 100 semillas, divididas en cuatro repeticiones de 25, las cuales se colocaron en cajas de Petri, se trataron con 13 ml de suspensión respectiva de NPs y se sometieron a un proceso de imbibición por 24 horas.

Posterior al tratamiento de imbibición, y con ayuda de unas pinzas de disección, las semillas se sembraron entre dos capas de papel Anchor humedecido con agua destilada, enrollándolas en forma de taco, los cuales se colocaron en bolsas de plástico transparente ordenadas por tratamiento,

y se situaron en una cámara bioclimática (Thermo Scientific), a una temperatura de 25 °C, con una humedad relativa de 75% y un fotoperiodo de 16 horas luz y 8 horas oscuridad.

4. Variables Evaluadas

4.1. Porciento de vigor de germinación

Al cuarto día después de la siembra, se realizó el primer conteo para determinar el número de plántulas normales, expresado en porciento, a fin de conocer el vigor de germinación de la semilla, parámetro que representa la velocidad y uniformidad de la germinación, considerando como plántulas normales a aquellas que poseen todas sus partes (radícula y vástago) sin ninguna anomalía visible.

4.2. Porciento de germinación

Al séptimo día después de la siembra se realizó la evaluación final del bioensayo, efectuando el segundo conteo para determinar el número total de plántulas normales, esto es, las que mostraron el potencial de desarrollarse en plantas satisfactorias cuando se establecen en un suelo y bajo condiciones favorables de humedad, temperatura y luz, expresado en porciento.

4.3. Porciento de plántulas con alto y bajo vigor

Las plántulas normales de la variable porciento de germinación, se clasificaron como plántulas con alto o bajo vigor, de acuerdo con la longitud de su plúmula y su radícula, se expresó en porciento.

4.4. Porciento de plántulas anormales

Se consideraron todas aquellas plántulas que presentaron un desarrollo irregular en alguna de sus estructuras morfológicas, o que carecían de las mismas, expresado en porcentaje.

4.5. Porcentaje de semillas sin germinar

En esta categoría se incluyeron todas aquellas semillas duras o muertas que no tuvieron la capacidad de germinar, el resultado se expresó en porcentaje.

4.6. Índice de radícula

En las plántulas normales obtenidas de cada tratamiento se midió la longitud de la radícula con ayuda de una tabla con hoja milimétrica, y se expresó en cm. Enseguida se dividió entre la longitud de la plúmula.

4.7. Índice de plúmula

En todas las plántulas normales de cada tratamiento se midió la longitud de la plúmula y se expresó en cm, utilizando una tabla con una hoja milimétrica. Enseguida se dividió entre la longitud de la radícula.

4.8. Peso seco de la radícula y del tallo

Una vez realizada la evaluación del bioensayo, se tomaron las plántulas normales de cada repetición por tratamiento, y se dividieron en radículas y en tallos, para posteriormente ser colocados en bolsas de papel de estraza, previamente identificadas, las cuales se pusieron en una estufa (Riossa modelo H-48), a una temperatura de 72 °C por un periodo de 24 horas. Posteriormente, se sacaron las muestras de la estufa y se pusieron en un desecador 30 minutos, a fin de evitar que tomaran humedad del ambiente. Una vez pasado el tiempo se pesó cada muestra en una balanza analítica

(Precisa modelo BJ610C), para determinar el peso de materia seca expresado en mg/plántula.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Bioensayo con NPsCuO

Los resultados obtenidos en el análisis de varianza (Cuadro 1), del bioensayo con semillas de maíz (*Zea mays*) de la variedad RX-715, tratadas con NPsCuO a diferentes concentraciones (0, 10, 20, 30, 40, 50 ppm), indican que las variables por ciento de vigor de germinación, peso seco de la plúmula, peso seco de radícula, índice de longitud de la plántula e índice de longitud de la radícula mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$), mientras que las variables por ciento de germinación, por ciento de plántulas de alto vigor, por ciento de plántulas de bajo vigor, por ciento de plántulas anormales y por ciento de semillas sin germinar no mostraron diferencias estadísticas significativas en la fuente de variación tratamientos.

Estos resultados coinciden con los reportados por Gutiérrez et al. (2018), quienes indicaron que la aplicación de NPsCuO no mostró diferencias significativas en las variables por ciento de vigor de germinación y por ciento de germinación, en semillas de tomate de la variedad Río Grande.

De acuerdo con la prueba de comparación de medias (Tukey $P \leq 0.05$), las variables relacionadas con el vigor de las semillas presentaron diferencias significativas, entre las que se incluye el porcentaje de vigor de la germinación, el cual respondió de manera diferencial a las concentraciones de las NPsCuO aplicadas en cada tratamiento (Cuadro 2). Se observó que al incrementar la concentración a 10 y 20 ppm se redujo el vigor de germinación, y en general ningún tratamiento superó estadísticamente al testigo. El vigor de germinación representa un conjunto de propiedades de las semillas que determinan el potencial para la germinación rápida de plántulas normales. En este sentido, Sánchez (2024)

encontró que la aplicación de NPsCuO y de sulfato de cobre a semillas y plántulas de jitomate de la variedad Floradade a una concentración de 100 ppm, aumentó significativamente la tasa de germinación y el vigor de germinación, sin embargo, también mostró alteraciones relacionadas con toxicidad en ambas variables al aumentar la concentración de las NPs, estos resultados confirman que el uso de NPsCuO afectan directamente el vigor de germinación, y el efecto depende de la concentración del tratamiento.

En la comparación de medias para las variables peso seco de plúmula y peso seco de radícula (Cuadro 2), se observaron respuestas muy similares en tendencia a la variable porcentaje de vigor de germinación. Para la variable peso seco de plúmula se obtuvo 34.40 mg/plántula en el tratamiento testigo, resultando estadísticamente superior y diferente a los tratamientos con 10 y 20 ppm de NPsCuO. Sin embargo, al incrementar la concentración a 30 y 40 ppm, se obtuvieron valores de 34.95 y 34.81 mg/plántula respectivamente, ambos estadísticamente igual al testigo ($Tukey \leq 0.05$). Por otra parte, el tratamiento con 50 ppm presentó 31.14 mg/plántula, siendo estadísticamente igual a los tratamientos con 10 y 20 ppm de NPsCuO. Lo anterior indica que a concentraciones de 10 y 20 ppm se presentó un efecto de toxicidad, no obstante, al incrementar las dosis de tratamiento a semillas, al germinar y desarrollarse las plántulas, estas generaron mayor biomasa equiparándose con el testigo. Posiblemente, tratando las semillas con una dosis de NPsCuO entre 30 y 40 ppm, se pudieran obtener mejores resultados para la variable peso seco de plúmula.

De igual manera, para la variable peso seco de radícula, el testigo (28.08 mg/plántula) resultó estadísticamente igual al tratamiento con 40 ppm (29.55 mg/plántula), el resto de los tratamientos presentaron valores significativamente inferiores al testigo, en un rango de 20.02 a 23.21 mg/plántula.

Para la variable índice de longitud de la plúmula, se obtuvo un valor superior y estadísticamente diferente al testigo en el tratamiento con 30 ppm (1.53), sin embargo, estadísticamente igual al tratamiento con 10 ppm (1.39), superando ambos al testigo que obtuvo 1.22.

Cuadro 1. Cuadros medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz RX-715 tratadas con NPsCuO.

FV	GL	Vigor %	GER %	PAV %	PBV %	PA %	SSG %	PSP (mg/p)	PSR (mg/p)	INDP	INDR
Tratamiento	5	119.60**	5.46 ^{NS}	21.86 ^{NS}	21.46 ^{NS}	3.20 ^{NS}	10.26 ^{NS}	39.25**	52.02**	0.0693**	0.0212**
Error	18	27.77	22.44	53.77	33.11	11.55	6.00	5.42	2.94	0.0094	0.0094
C. V.		6.02	4.92	8.02	119.05	169.96	133.60	7.27	7.01	7.33	7.40

** = Significativo al $P \leq 0.01$, NS = No significativo, FV=Fuentes de variación, GL=Grados de Libertad, GER=Germinación, PAV=Plántulas con alto vigor, PBV=Plántulas con bajo vigor, PA=Plántulas anormales, SSG=Semillas sin germinar, PSP=Peso seco de la plúmula, PSR=Peso seco de la radícula, INDP= Índice de longitud de la plúmula, INDR= Índice de longitud de radícula, p=plántula, C.V. = Coeficiente de variación.

De acuerdo con los resultados para la variable índice de longitud de radícula, los tratamientos testigo, 20 ppm y 40 ppm resultaron ser estadísticamente iguales, observándose numéricamente un mayor índice de longitud de radícula con el tratamiento donde se inhibieron semillas con NPsCuO a 40 ppm. Escobedo et al. (2020) indican que las nanopartículas de cobre, a concentraciones de 1.0, 1.5 y 2.0 ppm, tienen efecto citotóxico y genotóxico sobre el tejido meristemático radicular de *Allium cepa* L. "cebolla". A mayor concentración de nanopartículas el índice mitótico disminuye significativamente y el índice de anomalías aumenta; así mismo el número de horas de recuperación evaluadas no restableció los valores de índices mitóticos ni de anomalías.

De acuerdo con los resultados obtenidos el uso de las NPsCuO no mostró un efecto positivo en las variables relacionadas con el proceso de germinación y de vigor de plántulas, ninguno de los tratamientos superó el comportamiento del testigo. En este sentido Arredondo (2016) afirmó que el uso de nanopartículas de cobre modifica la germinación y el crecimiento de las plantas, así como en el vigor y la morfología de esta.

De acuerdo con los estudios presentados por Apaza Machacal et al. (2019), el exceso de metales pesados, como el cobre, provoca toxicidad en las plantas, en consecuencia, genera cambios en sus tejidos aéreos, afectando sus estomas cuya principal función es el intercambio gaseoso. La disminución del área foliar en las plantas tratadas con Cu probablemente afecta el fenómeno de transpiración, lo cual es observado las plantas tratadas con otros metales pesados. Estos resultados indican que el Cu provoca estrés a la planta y esta toma medidas para tolerar el exceso en su tejido foliar, como incremento en la expresión de la enzima POD y disminución de los niveles de prolina. Este costo de tolerancia reporta una pérdida de biomasa, y crecimiento lento en comparación con otros especímenes no expuestos a metales pesados. La pérdida de biomasa y el crecimiento lento probablemente se debe a que el Cu afecta el proceso de expansión celular

provocando la reducción del tamaño celular y en consecuencia reducción del tamaño de la raíz, del tallo y de las hojas.

Según Carvajal (2019), las diferentes especies reactivas (ROS, RNS) pueden originar un estado conocido como estrés oxidativo, aunque normalmente cuando se habla de este estado se refiere básicamente a los ROS. Los ROS son moléculas mensajeras que regulan una amplia variedad de procesos fisiológicos celulares incluyendo la proliferación, la diferenciación y la apoptosis, Los ROS son visualizados como reguladores fisiológicos de vías o cascadas de señalización intracelulares activadas por factores de crecimiento por medio de sus receptores *tirosín-quinasa*. El estado de estrés oxidativo sobreviene cuando el nivel de ROS/RNS se incrementa por encima del nivel idóneo, aumentando así su resistencia ante factores que influyen en su crecimiento foliar.

Cuadro 2. Comparación de medias por tratamiento para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz RX-715 tratadas con NPsCuO.

Tratamiento (ppm)	Vigor %	GER %	PAV %	PBV %	PA %	SSG %	PSP (mg/p)	PSR (mg/p)	INDP	INDR
0	92 a	97 a	93 a	4 a	2 a	1 a	34.40 a	28.08 a	1.22 cd	0.81 ab
10	85 ab	97 a	88 a	9 a	2 a	1 a	27.90 c	20.02 c	1.39 ab	0.71 cd
20	82 b	94 a	89 a	5 a	1 a	5 a	28.97 c	23.21 b	1.25 bcd	0.80 abc
30	93 a	96 a	92 a	4 a	3 a	1 a	34.95 a	22.68 b	1.53 a	0.65 d
40	92 a	96 a	94 a	2 a	3 a	1 a	34.81 a	29.55 a	1.18 d	0.85 a
50	81 b	97 a	92 a	5 a	1 a	2 a	31.14 bc	23.19 b	1.34 bc	0.74 bc
\bar{x}	87	96	91	5	2	2	32.03	24.45	1.32	0.76

Los valores con la misma literal dentro de una columna son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05). GER=Germinación, PAV=Plántulas con alto vigor, PBV=Plántulas con bajo vigor, PA=Plántulas anormales, SSG=Semillas sin germinar, PSP=Peso seco de la plúmula, PSR=Peso seco de la radícula, ppm=Partes por millón, INDP= Índice de longitud de la plúmula, INDR= Índice de longitud de radícula, p=plántula.

1. Bioensayo con NPsSe

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de varianza (Cuadro 3), en el bioensayo con semillas de Maíz (*Zea mays*) de la variedad RX-715, tratadas con NPsSe a concentraciones de 0, 5, 10, 15, 20, y 25 ppm, las variables semillas sin germinar, peso seco de la radícula, índice de longitud de la plántula e índice de longitud de la radícula mostraron diferencias estadísticas altamente significativas ($P \leq 0.01$), mientras que la variable plántulas con bajo vigor presentó diferencias significativas ($P \leq 0.05$). El resto de las variables (porcentaje de vigor, germinación, plántulas con alto vigor, plántulas anormales y peso seco de plúmula) no mostraron respuesta diferencial a los tratamientos.

Con respecto a la comparación de medias (Cuadro 4), se evidenció que al aplicar NPsSe se generaron modificaciones en las respuestas fisiológicas para las variables por ciento de plántulas de bajo vigor, peso seco de la radícula, índice de la longitud de la plúmula, e índice de longitud de la radícula, identificando diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados.

En el caso de la variable porcentaje de plántulas con bajo vigor se encontró que el suministro de NPsSe durante la imbibición, en concentraciones de 5 ppm, 10 ppm, y 25 ppm, generó respuestas por debajo del valor medio del testigo, que obtuvo un 10 %. Lo anterior es importante porque en las concentraciones de 5 y 10 ppm se observó un mayor porcentaje de plántulas de alto vigor. Esto es, al reducirse el porcentaje de plántulas con bajo vigor, se incrementó el porcentaje con alto vigor.

De manera similar, para la variable peso seco de radícula se observaron resultados estadísticamente diferentes, el tratamiento con 25 ppm mostró un incremento de 7.21 mg/radícula, con respecto al testigo, que

Cuadro 3. Cuadros medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación en semillas de maíz RX-715 tratadas con NPsSe.

FV	GL	Vigor %	GER %	PAV %	PBV %	PA %	SSG %	PSP (mg)	PSR (mg)	INDP (%)	INDR (%)
Tratamiento	5	38.40 ^{NS}	8.66 ^{NS}	16.66 ^{NS}	44.80 [*]	2.66 ^{NS}	7.60 ^{NS}	8.45 ^{NS}	53.00 ^{**}	0.2827 ^{**}	0.0459 ^{**}
Error	18	37.77	19.77	47.77	16.00	7.55	8.22	12.86	8.75	0.0445	0.0061
C. V. (%)		6.75	4.64	7.52	100.00	103.07	191.16	9.60	13.03	12.45	12.87

** =Altamente significativo, * =Significativo, NS =No significativo, FV=factores variables, GL=Grados de Libertad, GER=Germinación, PAV=Plántulas con alto vigor, PBV=Plántulas con bajo vigor, PA=Plántulas anormales, SSG=Semillas sin germinar, PSP=Peso seco de la plúmula, PSR=Peso seco de la radícula, mg=miligramos, INDP= Índice de longitud de la plúmula, INDR= Índice de longitud de radícula, C.V.=Coeficiente de variación

obtuvo 21.94 mg/radícula. En contraste, el tratamiento con la concentración de 15 ppm obtuvo el valor más bajo, ya que se redujo a 17.87 mg/radícula con respecto al testigo, que obtuvo 21.94 mg/radícula), resultando una diferencia de 4.07 mg/radícula. Esto sugiere que el uso de las NPsSe a 25 ppm influye en forma positiva en la acumulación de materia seca de las radículas.

En relación a la variable índice de longitud de las plúmulas, se mostraron diferencias en la longitud en todos los tratamientos, no obstante los resultados estadísticamente superiores se registraron en el tratamiento con 15 ppm, que obtuvo un incremento de 0.39 en comparación con el testigo (1.66), por otro lado el tratamiento con la concentración de 25 ppm arrojó resultados inferiores a lo esperado, reduciendo su tamaño 0.42 con respecto al testigo (1.66), dándonos a entender que la presencia de las NPsSe afectan de forma directa el crecimiento de las plántulas en el mesócotilo, coleóptilo y plúmula. De acuerdo con los resultados para la variable índice de longitud de radícula, el tratamiento con 25 ppm mostró una significativa mejora en el crecimiento, aumentando la longitud de la radícula en 0.20 con respecto a la longitud del testigo (0.60), caso contrario, el tratamiento con 15 ppm mostró una disminución de 0.11 en comparación con el testigo (0.60). Así, el tratamiento con 25 ppm redujo el crecimiento de la plúmula, y promovió el crecimiento de la radícula.

Con relación a los resultados obtenidos en este trabajo, se muestra que el selenio tiene una influencia directa en el desarrollo de la radícula principalmente, coincidiendo con las aportaciones de León (2019), quien indica que el selenio influye tanto de manera positiva como negativa en la morfología de las plantas, más sin embargo según esta investigación, el efecto depende de la concentración.

Estos resultados coinciden con otros trabajos con diferentes NPs, como el presentado por García et al. (2023), quienes mostraron que el uso

de NPsZn influyen directamente la morfología de la planta, incluyendo en características como la longitud de la plántula y la radícula, al igual que en el peso de la radícula. Las diferentes concentraciones de NPs, afectan estas variables sugiriendo que micronutrientes como el selenio y el zinc afectan directamente dichas variables.

Por el contrario, Hernández et al. (2024) encontraron que la aplicación de selenio en dos variedades criollas de maíz de la raza “Mejen” mejoró significativamente la tasa de germinación en los tratamientos de 50 ppm en comparación a las no tratadas, por lo tanto, el efecto de las NPsSe puede ser positivo o negativo, dependiendo de la concentración del tratamiento y de los genotipos de las variedades. En un estudio realizado por González-Chávez et al. (2022) en pimiento, el suministro de 1 μM de selenio mediante aplicación radical y 5 μM de selenio mediante aplicación foliar, estimularon el crecimiento en las plántulas, no obstante, se observó un efecto negativo en concentraciones más altas.

De acuerdo con estudios presentados por Gaucin-Delgado et al. (2021), el Se incrementa el rendimiento y evita la oxidación al regular la captación y redistribución de elementos esenciales en los sistemas antioxidantes o manteniendo el equilibrio iónico y la integridad estructural de la célula, permitiéndole a la planta adaptarse metabólicamente como fisiológicamente como respuesta al ataque del estrés oxidativo causado por el incremento de radicales libres bajo condiciones de estrés. La biosíntesis de compuestos fenólicos, flavonoides y capacidad antioxidante fue influenciada positivamente por la aplicación de Se; diversas investigaciones han demostrado que su aplicación puede incrementar la producción de compuestos bioactivos como fenoles, flavonoides y capacidad antioxidante, atribuyendo la acción sinérgica que tiene, al poder actuar como un elemento vital alterando varios procesos fisiológicos y bioquímicos, además el Se afecta directamente el sistema de defensa antioxidante al aumentar el potencial de las plantas para sobreponerse a las condiciones de estrés biótico y abiótico.

Cuadro 4. Comparación de medias por concentración para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación en semillas de maíz RX-715 tratadas con NPsSe.

Tratamiento (ppm)	Vigor %	GER %	PAV %	PBV %	PA %	SSG %	PSP (mg)	PSR (mg)	INDP	INDR
Testigo	85 a	98 a	88 a	10 a	2 a	0 a	36.35 a	21.94 bc	1.66 b	0.60 b
5	93 a	94 a	93 a	1 b	2 a	4 a	37.03 a	22.87 b	1.62 b	0.61 b
10	91 a	95 a	94 a	1 b	3 a	2 a	40.07 a	22.33 bc	1.81 ab	0.56 b
15	93 a	96 a	92 a	4 ab	3 a	1 a	36.50 a	17.87 c	2.05 a	0.49 b
20	91 a	97 a	92 a	5 ab	2 a	1 a	37.74 a	21.93 bc	1.75 ab	0.57 b
25	93 a	95 a	92 a	3 b	4 a	1 a	36.25 a	29.15 a	1.24 c	0.80 a
\bar{x}	91	96	92	4	3	2	37.32	22.68	1.69	0.61

Los valores con la misma literal dentro de una columna son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

GER=Germinación, PAV=Plántulas con alto vigor, PBV=Plántulas con bajo vigor, PA=Plántulas anormales, SSG=Semillas sin germinar, PSP=Peso seco de la plúmula, PSR=Peso seco de la radícula, ppm=Partes por millón, mg=miligramos, INDP= Índice de longitud de la plúmula, INDR= Índice de longitud de radícula.

2. Análisis de correlación para el estudio con NPsCuO

Los coeficientes de correlación de Pearson se presentan en el Cuadro 5. Se observó al tratar semillas con NPsCuO una correlación positiva ($P \leq 0.01$) entre la variable porcentaje de vigor de germinación y porcentaje de plántulas con alto vigor ($r = 0.5958$); y $P \leq 0.05$ positiva con la variable peso seco de radícula. Así como correlaciones negativas ($P \leq 0.05$) con el porcentaje de plántulas de bajo vigor, y con el porcentaje de semillas sin germinar ($r = -0.4064$). Lo anterior indica que un aumento en el vigor de germinación está asociado con el incremento en peso seco de la radícula. También se observó correlación positiva ($P \leq 0.01$) entre el porcentaje de germinación y la variable porcentaje de plántulas con alto vigor ($r = 0.5907$), y correlación negativa con las variables porcentaje de plántulas anormales ($r = -0.7978^{**}$) y de semillas sin germinar ($r = 0.699^{**}$). La variable plántulas con alto vigor se correlacionó negativamente con tres variables, porcentaje de plántulas con bajo vigor ($r = -0.7750^{**}$), plántulas anormales ($r = -0.5211^{**}$), y con el índice de plúmula ($r = -0.4254^*$). La variable plántulas con bajo vigor se correlacionó negativamente con el peso seco de radícula ($r = -0.5025^*$). Una correlación interesante se observó entre las variables peso seco de radícula y peso seco de plúmula ($r = -0.6341^*$). Por otra parte, la variable peso seco de radícula presentó correlación con dos variables, el índice de plúmula ($r = -0.6563^{**}$) y el índice de radícula ($r = 0.7062^{**}$). Finalmente, la variable índice de plúmula se correlacionó negativamente con el índice de radícula ($r = -0.9883^{**}$).

Las correlaciones anteriores indican que, al incrementarse el vigor de la germinación, se incrementa el porcentaje de plántulas con alto vigor. Asimismo, las plántulas con alto vigor presentan un alto índice de radícula por la correlación ($P \leq 0.05$) que se observó entre ambas variables. Importante es indicar que con la imbibición de semillas con NPsCuO, se da una correlación positiva entre los pesos secos de la radícula y de la plúmula, lo cual indica una acumulación simultánea de biomasa en ambas estructuras.

Cuadro 5. Coeficientes de correlación entre las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz RX-715 tratadas con nanopartículas de Cobre (Cu).

	GER	PAV	PBV	PA	SSG	PSP	PSR	INDP	INDR
Vigor	0.3981 NS	0.5958 **	-0.4255 *	-0.2097 NS	-0.4064 *	0.3201 NS	0.4414 *	-0.1976 NS	0.2788 NS
GER		0.5907 **	0.052 NS	-0.7978 **	-0.6993 **	-0.3254 NS	-0.0167 NS	-0.2619 NS	0.2722 NS
PAV			-0.775 **	-0.5211 **	-0.3540 NS	0.0816 NS	0.3954 NS	-0.4254 *	0.4557 *
PBV				0.0201 NS	-0.1095 NS	-0.3559 NS	-0.5025 *	0.3213 NS	-0.3508 NS
PA					0.1270 NS	0.5062 *	0.095 NS	0.3518 NS	-0.3451 NS
SSG						-0.0648 NS	-0.0851 NS	0.0138 NS	-0.0388 NS
PSP							0.6341 *	0.1592 NS	-0.0945 NS
PSR								-0.6563 **	0.7062 **
INDP									-0.9883 **

** =Altamente significativo, * =Significativo, NS =No significativo, GER=Germinación, PAV=Plántulas con alto vigor, PBV=Plántulas con bajo vigor, PA=Plántulas anormales, SSG=Semillas sin germinar, PSP=Peso seco de la plúmula, PSR=Peso seco de la radícula, INDP = Índice de longitud de la plúmula, INDR= Índice de longitud de radícula

3. Análisis de correlación para el estudio con NPsSe

Los coeficientes de correlación de Pearson se presentan en el Cuadro 5. Se observaron correlaciones positivas significativas entre las variables porcentaje de vigor de germinación y porcentaje de germinación ($r = 0.5355^{**}$), porcentaje de plántulas con alto vigor ($r = 0.8070^{**}$) y el índice de radícula ($r = 0.4105^{*}$). La variable porcentaje de germinación se correlacionó con las variables porcentaje de plántulas con alto vigor ($r = 0.6767^{**}$) y negativamente con el peso seco de la plúmula ($r = -0.41268^{*}$). El peso seco de la radícula se correlacionó positivamente con el índice de radícula ($r = 0.8883^{**}$) y negativamente con el índice de plúmula (-0.8897^{**}).

En general se presentaron correlaciones positivas entre variables que dependen del vigor de la semilla. El vigor determina el nivel de actividad y el comportamiento de las semillas en un amplio rango de ambientes, además se relaciona con la velocidad y uniformidad de germinación y crecimiento de las plántulas.

Cuadro 6. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación en semillas de maíz RX-715 tratadas con NPsSe.

	GER (%)	PAV (%)	PBV (%)	PA (%)	SSG (%)	PSP (%)	PSR (%)	INDP (%)	INDR (%)
Vigor	0.5355 **	0.8070 **	-0.6225 **	-0.4433 *	0.3873 NS	-0.1948 NS	0.3274 NS	-0.3809 NS	0.4105 *
GER		0.6767 **	-0.3530 NS	-0.7425 **	-0.7998 **	-0.4126 *	0.1352 NS	-0.3265 NS	0.3112 NS
PAV			-0.7597 **	-0.5257 **	-0.5204 **	-0.0368 NS	0.3291 NS	0.3205 NS	0.3430 NS
PBV				0.0578 NS	0.0000 NS	-0.3144 NS	-0.3227 NS	0.1467 NS	-0.1907 NS
PA					0.1920 NS	0.1672 NS	-0.2188 NS	0.3495 NS	-0.2897 NS
SSG						0.4548 *	-0.0020 NS	0.1652 NS	-0.1905 NS
PSP							0.1966 NS	0.2355 NS	-0.2678 NS
PSR								-0.8897 **	0.8883 **
INDP									-0.9739 **

** =Altamente significativo, * =Significativo, NS =No significativo, GER=Germinación, PAV=Plántulas con alto vigor, PBV=Plántulas con bajo vigor, PA=Plántulas anormales, SSG=Semillas sin germinar, PSP=Peso seco de la plúmula, PSR=Peso seco de la radícula, INDP = Índice de longitud de la plúmula, INDR= Índice de longitud de radícula

VIII. Conclusiones

Inhibir las semillas de maíz en suspensiones con las NPsCuO en diferentes concentraciones, no afectó su capacidad germinativa, sin embargo, se observó un efecto de toxicidad en las variables peso seco de radícula y peso seco de plúmula, ya que ningún tratamiento superó estadísticamente al testigo.

En la variable índice de longitud de plúmula, se superó al testigo al imbibir las semillas con NPsCuO a 10 y 30 ppm, posiblemente promoviendo la división o la elongación celular.

Inhibir las semillas en suspensiones con NPsSe no modificó la respuesta de las variables vigor de germinación y germinación, ya que todos los tratamientos mostraron ser estadísticamente iguales, no obstante, promovieron el crecimiento de las radículas al aplicar 25 ppm, superando estadísticamente al testigo.

En la variable índice de plúmula, el tratamiento a semillas con NPsSe (15 ppm) durante la imbibición, resultó estadísticamente superior al resto de los tratamientos.

En la variable índice de radícula, el tratamiento con 25 ppm superó estadísticamente a todos los tratamientos.

Las correlaciones en el estudio con NPsCuO, mostraron coeficientes positivos y significativos entre la variable vigor de germinación y plántulas con alto vigor, así como con el peso seco de la radícula.

La variable porcentaje de germinación se correlacionó significativamente con la variable porcentaje de plántulas con alto vigor, al tratar las semillas durante la imbibición con NPsCuO. Además, el peso seco la plúmula se correlacionó positivamente con el peso seco de la radícula.

Inhibir semillas en suspensiones con NPsSe, mostró correlación entre variables relacionadas con el vigor de la semilla (porcentaje de germinación y porcentaje de plántulas con alto vigor), dejando ver su efecto en el metabolismo celular.

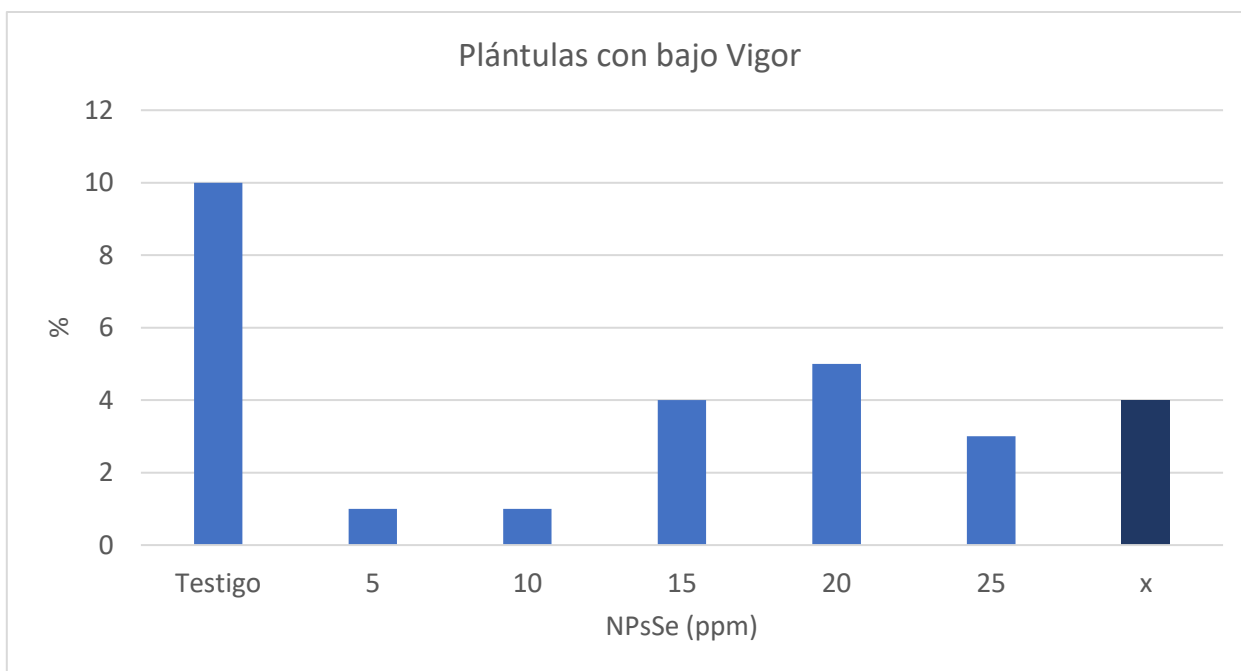
IX. BIBLIOGRAFÍA

- Apaza Machacal, D. A., Mestas Valdivia, B. R., Romero Vargas, F. F., & Navarro Oviedo, R. D.** (2019). Toxicidad del cobre sobre la morfología de estomas de *Gochnatia arequipensis* Sandwith (Asteraceae) de dos localidades de Arequipa, Perú. *Idesia (Arica)*, 37(3), 81-87.
- Arredondo Quijada, J. A.** (2016). Nanopartículas de cobre como promotoras de germinación de semillas y crecimientos de plantas de *Capisicum annuum* y *Lycopersicum esculentum*. *Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. Repositorio.uaaan.mx*
- Becvort-Azurra, A., Fuentes-Lara, L. O., Benavides-Mendoza, A., Ramírez, H., Robledo-Torres, V., & Rodríguez-Mendoza, M. D. L. N.** (2012). Aplicación de selenio en tomate: crecimiento, productividad y estado antioxidante del fruto. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 291-301.
- Carvajal, C.** (2019). Especies reactivas del oxígeno: formación, función y estrés oxidativo. *Medicina Legal de Costa Rica*, 36(1), 91-100.
- Castillo-Godina, R., Foroughbakhch-Pournavab, R., & Benavides-Mendoza, A.** (2013). Efecto del selenio sobre la cuantificación de ácido ascórbico en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Planta*, 8(17), 21-23.
- Chico-Ruíz, J., Cerna-Rebaza, L., Llontop L., F. G., Calvo M., D. R. C., Miranda M., Y. S., & Rosales C., S. R.** (2022). Excesso de cobre inibe o crescimento de *Bidens pilosa* em condições de laboratório. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 6(16), 166-177.
- Escobedo, C., J. Rodríguez, M. Contreras, C. Aspajo, A. Calderón, E. León, B. Cornejo, C. Aldama, J. Agreda & M. Valverde.** 2020. Citotoxicidad y genotoxicidad de nanopartículas de cobre sobre *Allium cepa* L. (Amaryllidaceae). *Arnaldoa* 27 (1):181-190. doi.org/10.22497/arnaldoa.271.27110

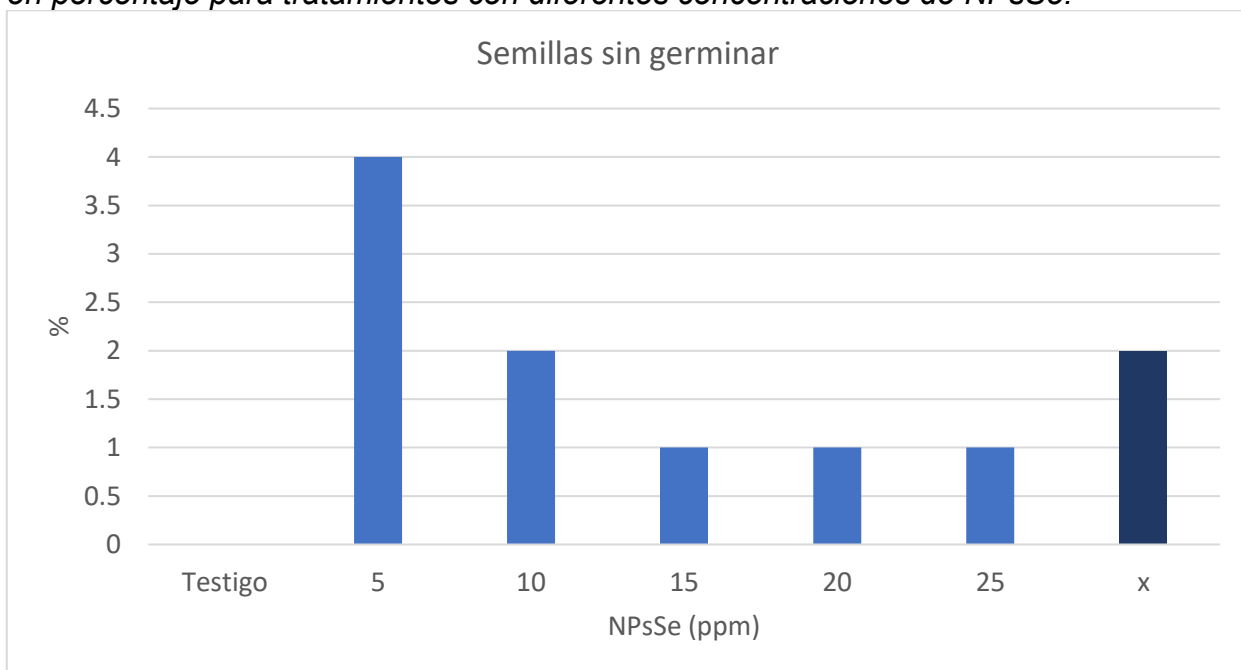
- García**, G. M., Maldonado, A. J., Galindo, R. B., Morales, S. G., De La Fuente, M. C., Vega, M. S., & Méndez, A. (2023). Zinc oxide nanoparticle morphology modify germination and early growth of bell pepper seedlings: Zinc oxide nanoparticle morphology. *Biotecnia*, 25(3), 5-15.
- Gaucin-Delgado**, J. M., Preciado-Rangel, P., González-Salas, U., Sifuentes-Ibarra, E., Núñez-Ramírez, F., & Vidal, J. A. O. (2021). La biofortificación con selenio mejora los compuestos bioactivos y la actividad antioxidante en chile jalapeño. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(8), 1339-1349.
- González-Chávez**, O., Alejo-Santiago, G., Bugarín-Montoya, R., Juárez-Rosete, C.R., Arrieta-Ramos, B.G., y Juárez-López, P. 2022. Concentration and application method of selenium in pepper seedlings. *Biotecnia*, vol. 24, No, 2, pp. 112-119.
- Gutiérrez Ramírez**, A. (2018). Evaluación del efecto de las nanopartículas de óxido de cobre (CuO) en cuanto a la germinación, desarrollo de planta y asimilación de CO₂ en tomate (*Solanum lycopersicum*) variedad Río Grande. *Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. Repositorio.uaaan.mx*
- Hernández**, L. Y. M., Quiroz, C. M., Sánchez, N. C. A., López, C. J. A., de la Cruz Lázaro, E., & Morales, A. E. M. (2024). Selenium treatment enhances the germination and growth of corn seedlings: Selenium induced corn germination and growth. *Revista Bio Ciencias*, 11.
- INTAGRI**. 2018. Papel del Selenio en la Nutrición Vegetal. Serie Nutrición Vegetal, Núm. 123. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 7 p. Extraído de <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/papel-del-selenio-en-la-nutricion-vegetal>.
- León-Morales**, J. M., Panamá-Raymundo, W., Langarica-Velázquez, E. C., & García-Morales, S. (2019). Selenium and vanadium on seed germination and seedling growth in pepper (*Capsicum annuum* L.) and radish (*Raphanus sativus* L.). *Revista Bio Ciencias* 6.

- Macias-Sandoval**, A. S. (2022). Efecto de las nanopartículas de selenio en las plantas, CIATEJ, Campus Zapopan, Jalisco. ITESO
- Mengel**, K., & Kirkby, E. A. (2000). Principios de nutrición vegetal, International Potash Institute Schneidergasse, Basel, Suiza.
- Miranda**, C. L., & Sauza, F. (2023). Evaluación de la fitotoxicidad de nanopartículas de cobre metálico y óxido de cobre II en la germinación de semillas de *Zea mays* (maíz). repositorio.ugto.mx
- Setty**, J., Samant, S. B., Yadav, M. K., Manjubala, M., & Pandurangam, V. (2023). Beneficial effects of bio-fabricated selenium nanoparticles as seed nanoprimer agent on seed germination in rice (*Oryza sativa* L.). *Scientific Reports*, 13(1), 22349.
- Smeets**, K., Opdenakker K, Remans T., Forzani, C., Hirt, H., Vangronsveld, J., and Cuypers, A. 2013. The role of the kinase OXI1 in cadmium-and-copper-induced molecular responses in *Arabidopsis thaliana* Plant, Cell and Environment (2013) 36, 1228–1238.
- Sors TG**, Ellis DR, Salt DE (2005). Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants. *Photosynthesis Research* 86: 373-389.
- Tito**, L. (2014). Efecto del sulfato de cobre pentahidratado sobre patógenos foliares en tres densidades poblacionales en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.). *Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/5614>*
- Villegas-Torres**, O. G., Domínguez-Patiño, M. L., Martínez-Jaimes, P., & Aguilar-Cortes, M. (2015). Cobre y níquel, microelementos esenciales en la nutrición vegetal. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*, 2(2), 285-295.
- Wing** C., E. G. (2006). Las Nanopartículas: pequeñas estructuras con gran potencial. *El Inin Hoy, Contacto Nuclear*, 24-29.

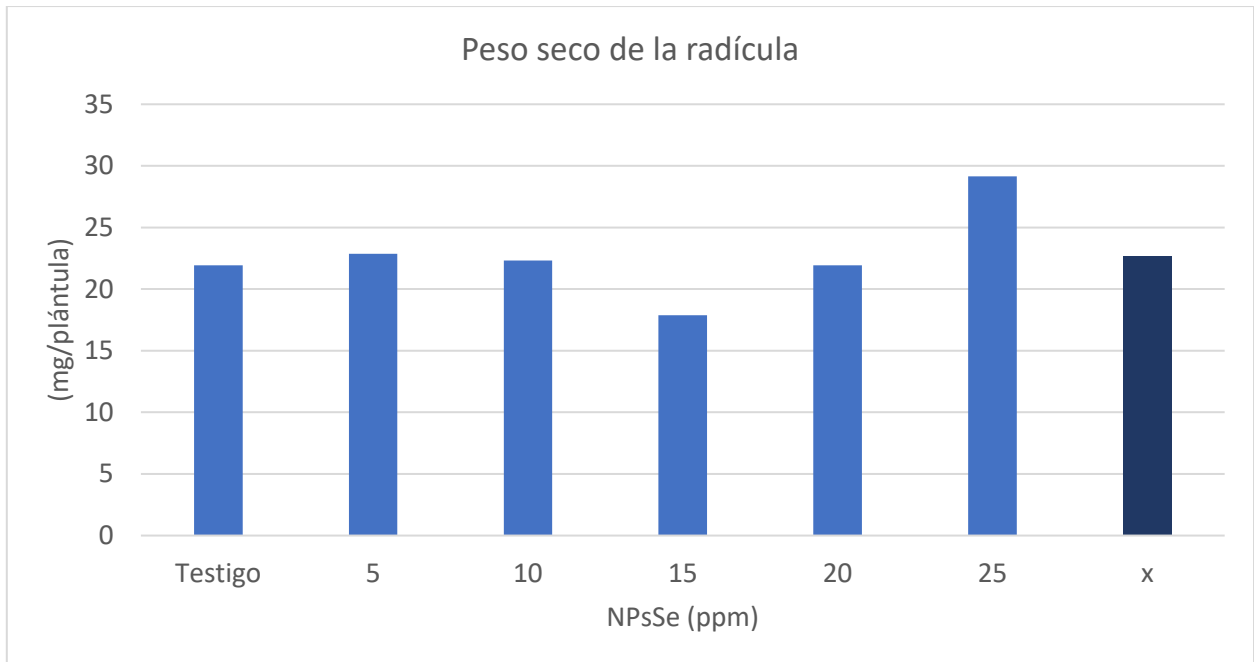
X. Anexos



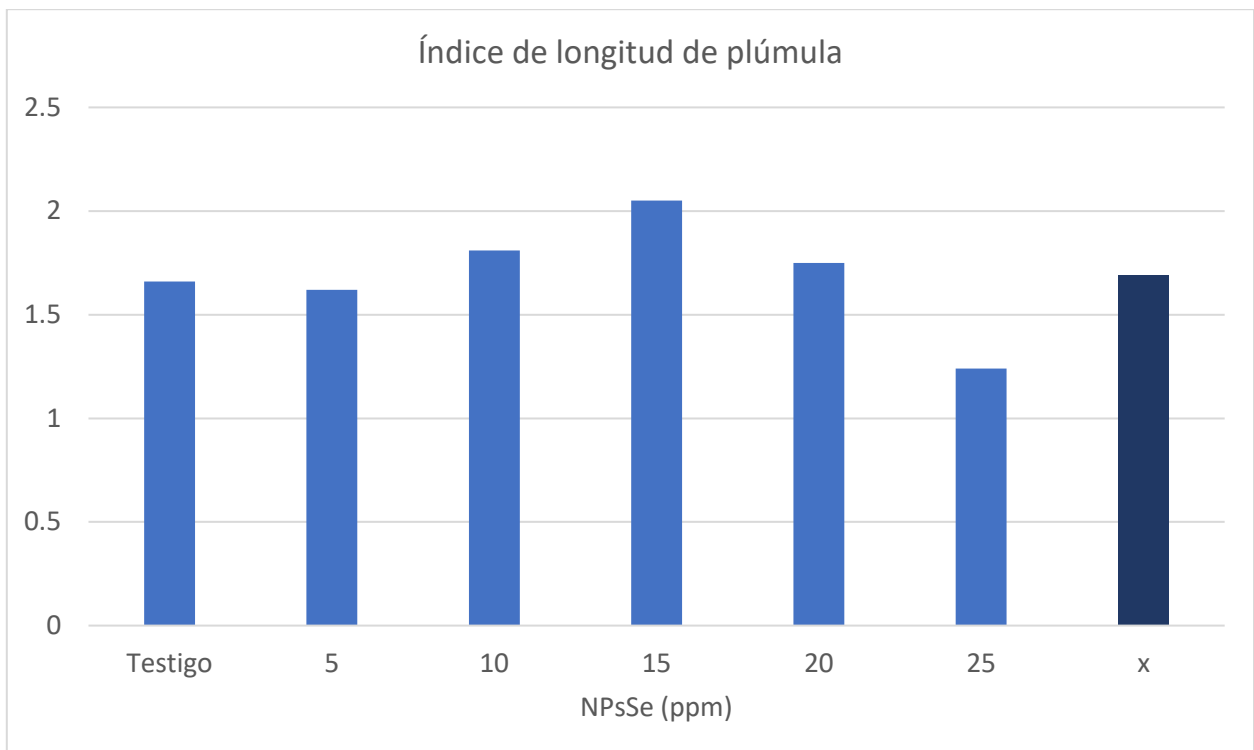
Anexo 1. Valores medios de la variable plántulas con bajo vigor (PBV) expresados en porcentaje para tratamientos con diferentes concentraciones de NPsSe.



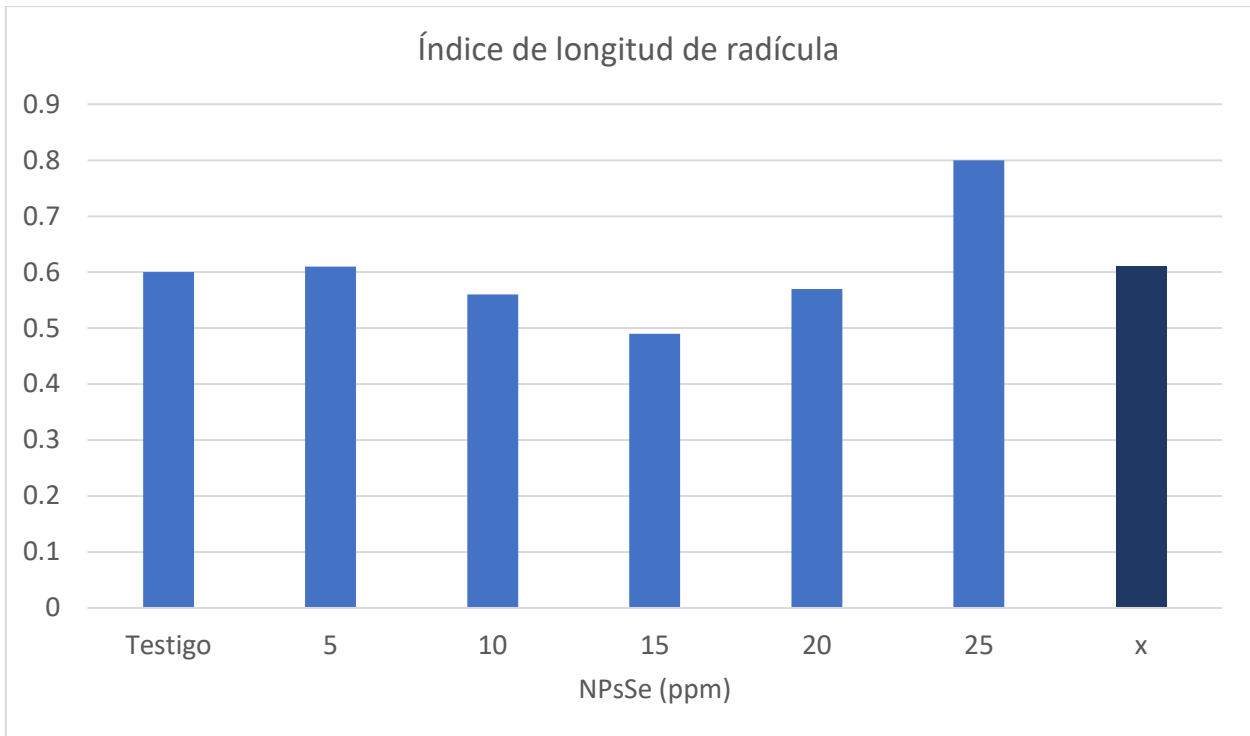
Anexo 2. Valores medios de la variable semillas sin germinar expresados en porcentaje para tratamientos con diferentes concentraciones de NPsSe.



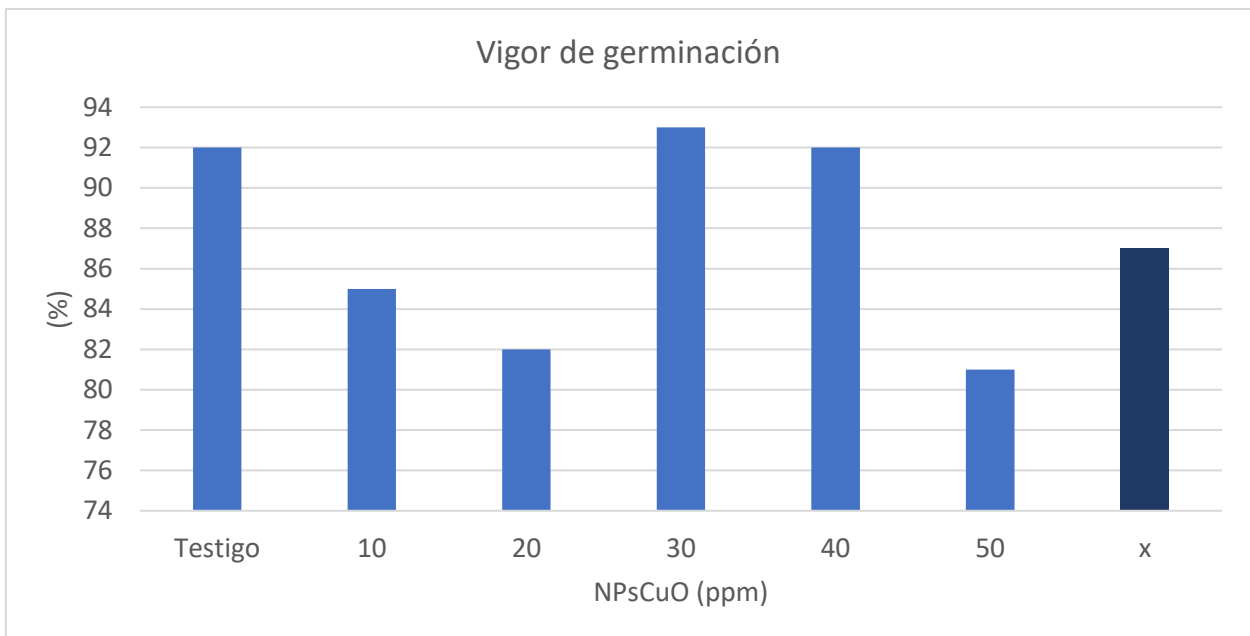
Anexo 3. Valores medios por tratamiento con NPsSe para la variable peso seco de radícula.



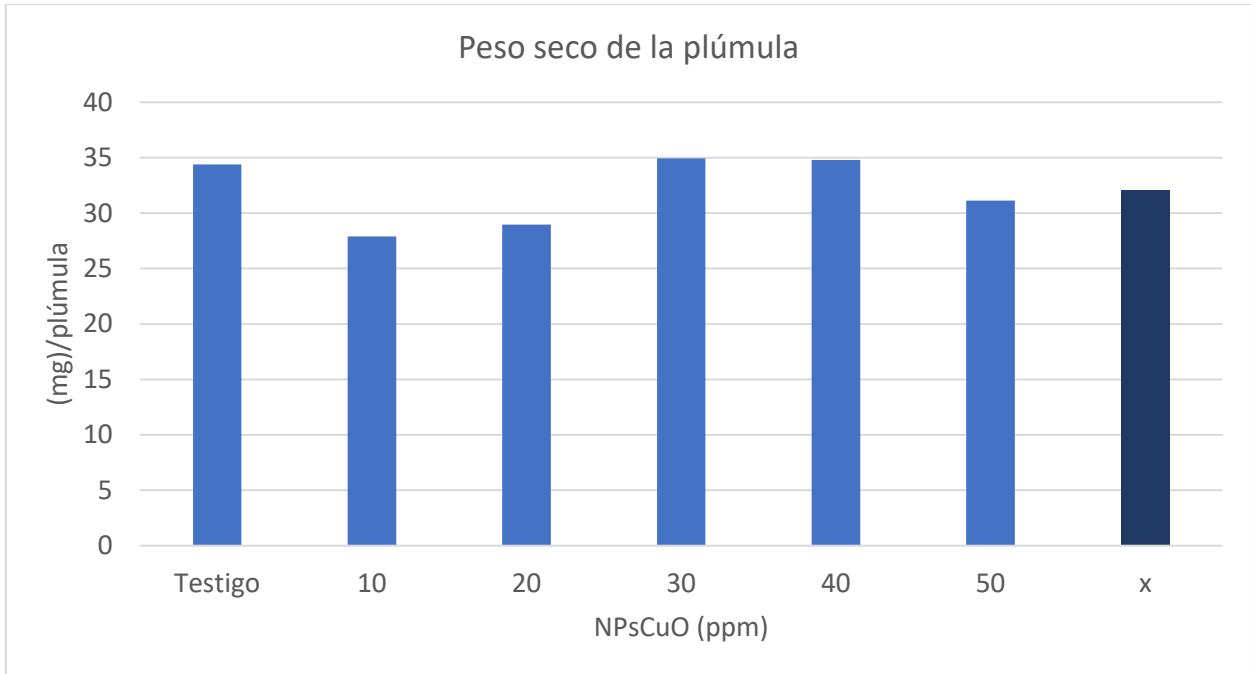
Anexo 4. Valores medios por tratamiento con NPsSe para la variable índice de longitud de la plúmula (INDP).



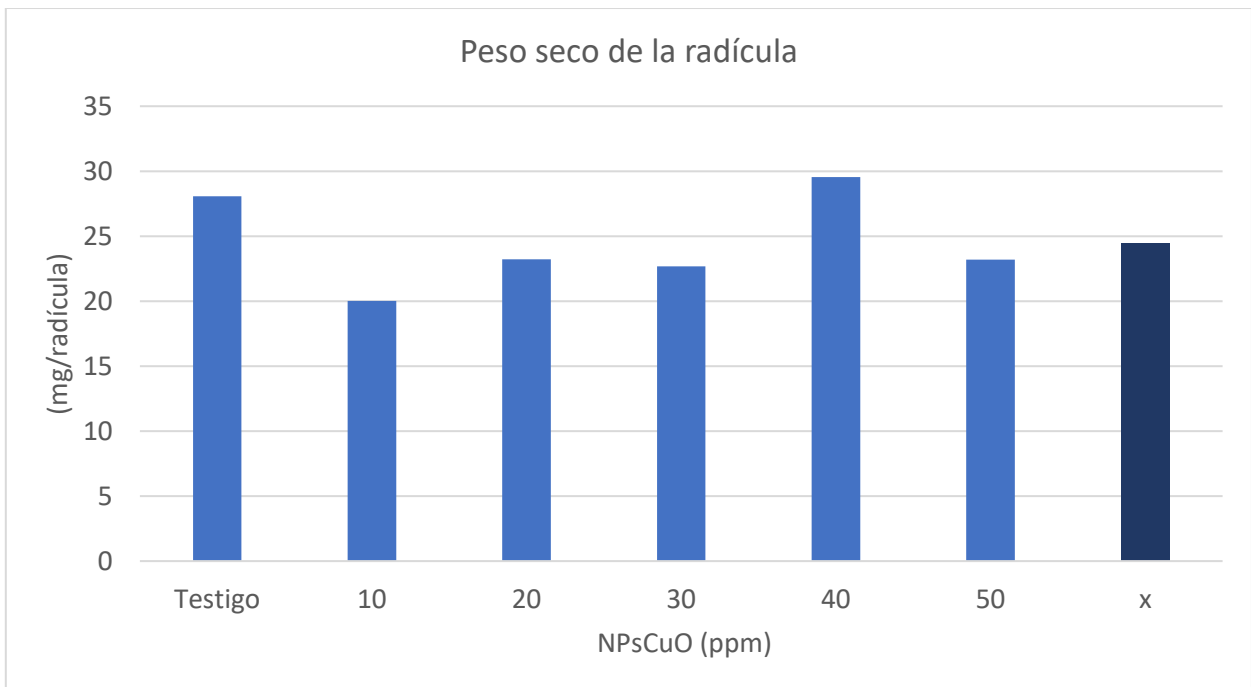
Anexo 5. Valores medios por tratamiento con NPsSe para la variable índice de longitud de la radícula (INDR).



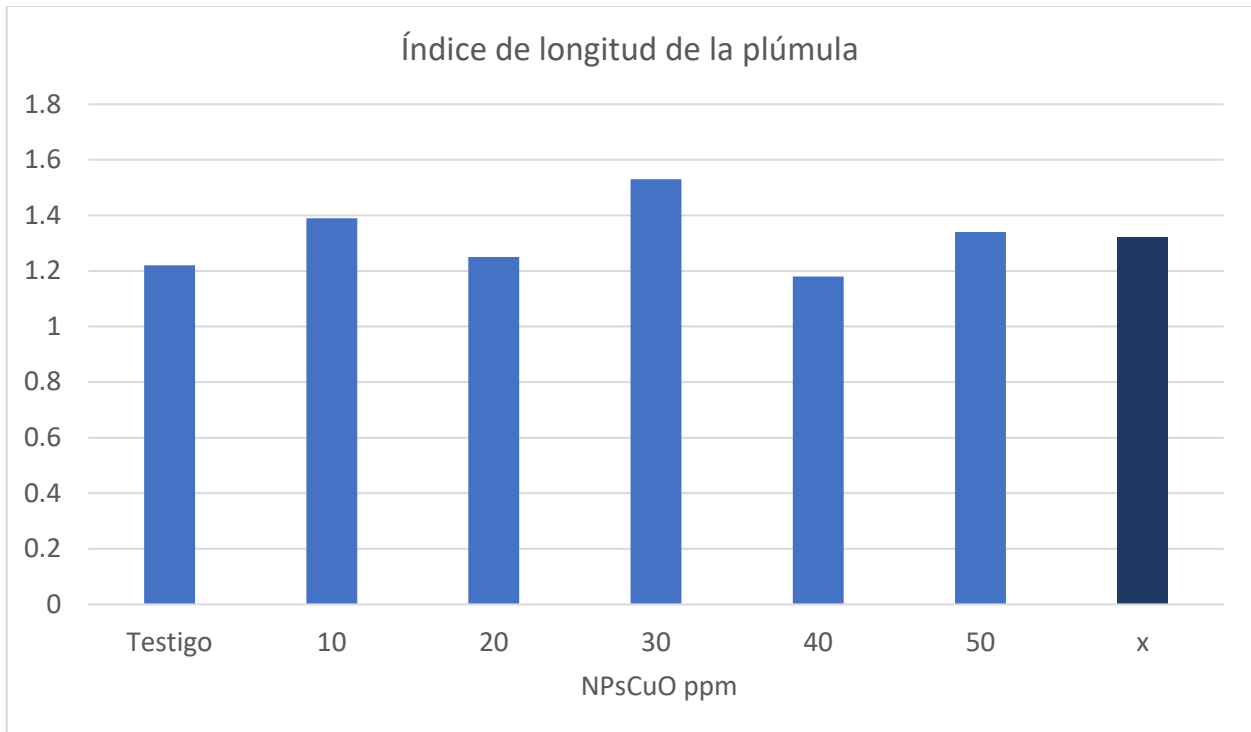
Anexo 6. Valores medios de la variable vigor de germinación expresados en porcentaje para tratamientos con diferentes concentraciones de NPsCuO.



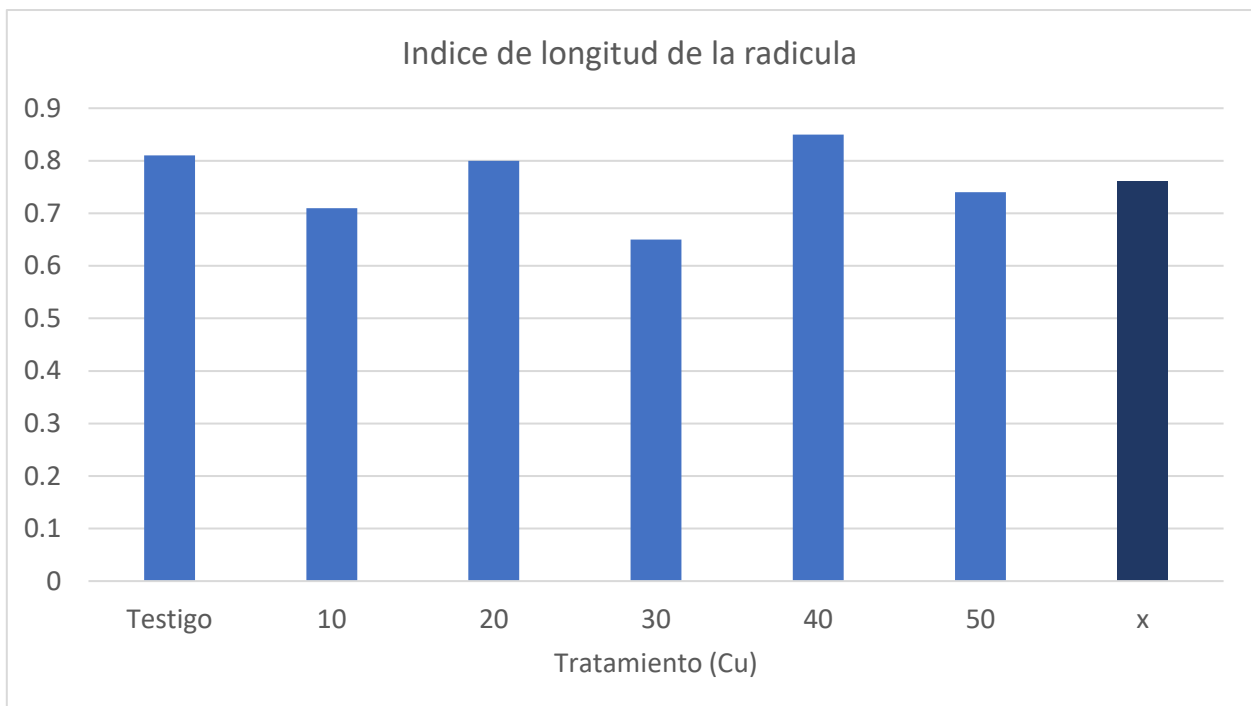
Anexo 7. Valores medios por tratamiento con NPsCuO para la variable peso seco de la plúmula.



Anexo 8. Valores medios por tratamiento con NPsCuO para la variable peso seco de la radícula.



Anexo 9. Valores medios por tratamiento con NPsCuO para la variable índice de longitud plúmula (INDP).



Anexo 10. Valores medios por tratamiento con NPsCuO para la variable índice de longitud de la radícula (INDR).